

室温 Er:YAG 级联脉冲激光器的实验探究

王思博¹, 田野¹, 曲波¹, 朱占达^{1,2,3,4}, 惠勇凌^{1,2,3,4}, 雷旬^{1,2,3,4**}, 李强^{1,2,3,4*}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;³激光先进制造北京市高等学校工程研究中心, 北京 100124;⁴跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 报道了室温下级联中红外 Er:YAG 脉冲激光器。通过实验观测到级联发射的特征波长为 1469 nm, 确定了激发态吸收的特征波长为 1676 nm。采用掺杂浓度(原子数分数)分别为 7.5% 和 10% 的两种 Er:YAG 晶体, 通过实验对比了级联与非级联条件下的中红外输出能量。掺杂浓度为 7.5% 的 Er:YAG 中红外激光的最大单脉冲能量由非级联时的 0.62 mJ 提高至级联时的 0.99 mJ, 提高了约 59.7%; 掺杂浓度为 10% 的 Er:YAG 中红外激光的最大单脉冲能量由非级联时的 1.04 mJ 提高至级联时的 1.51 mJ, 提高了约 45.2%。实验结果表明, 常温低掺杂 Er:YAG 晶体可实现级联输出, 并且级联有助于中红外激光单脉冲能量的提高。

关键词 激光器; Er³⁺ 激光器; 级联; 中红外激光器; 激发态吸收

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0914001

Experimental Exploration of Er:YAG Cascaded Pulsed Laser at Room Temperature

Wang Sibol¹, Tian Ye¹, Qu Bo¹, Zhu Zhanda^{1,2,3,4}, Hui Yongling^{1,2,3,4},
Lei Hong^{1,2,3,4**}, Li Qiang^{1,2,3,4*}

¹Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing 100124, China;

³Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Advanced Laser Manufacturing, Beijing 100124, China;

⁴Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China

Abstract Cascaded mid-infrared (MIR) Er:YAG pulsed lasers at room temperature are reported. The characteristic wavelength of the cascaded emission is experimentally observed to be 1469 nm, and that of the excited-state absorption is determined as 1676 nm. Er:YAG crystals with doping concentrations (atomic number fractions) of 7.5% and 10% are adopted to compare the MIR output energy under the cascade and non-cascade conditions. For the Er:YAG with a doping concentration of 7.5%, the maximum single pulse energy of MIR laser increases from 0.62 mJ (non-cascade) to 0.99 mJ (cascade), increasing by about 59.7%, and for Er:YAG with a doping concentration of 10%, that increases from 1.04 mJ (non-cascade) to 1.51 mJ (cascade), increasing by about 45.2%. The experimental results confirm the existence of cascade output at room temperature in low-doped Er:YAG crystals. The cascade is helpful to improve the single pulse energy of the mid-infrared laser.

Key words lasers; Er³⁺ laser; cascade; mid-infrared laser; excited-state absorption

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2021-11-09; 录用日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(62075003)、北京市自然科学基金(4202007, KZ202110005010)

通信作者: *ncltlq@bjut.edu.cn; **leihong@bjut.edu.cn

1 引言

3 μm 中红外激光源因其波长的独特优势,在民用和军用等诸多领域拥有重要的应用价值,包括光谱学、遥感、红外对抗等^[1],且高功率的中红外激光器在大气成分测量方面具有精度高的优势^[2]。

Er^{3+} 离子 $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 之间的能级跃迁对应 3 μm 中红外辐射,这是目前产生 3 μm 波段中红外激光最为简便的方式。然而,绝大多数基质材料中 Er^{3+} 离子的中红外下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 寿命通常会长于上能级 $^4\text{I}_{11/2}$,存在显著自终止效应^[3],从而抑制中红外激光振荡。目前克服自终止效应的方法主要有提高增益介质掺杂浓度、共掺杂退敏化离子和级联近红外波段激光振荡三种方式。其中,采用高掺杂浓度、通过能量传递上转换(ETU)过程来实现激发粒子的循环,可在减少 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级粒子数的同时增加 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级粒子数,从而实现中红外上、下能级之间粒子数的反转。1999 年,Chen 等^[4]在掺杂浓度(原子数分数)为 50% 的高掺杂 $\text{Er}:\text{YAG}$ 中获得了瓦级 2.94 μm 连续激光输出,斜效率达 34%;2015 年,Shen 等^[5]以掺杂浓度为 38% 的 $\text{Er}:\text{YSGG}$ 板条为激光增益介质,获得了近 2 W 的中红外连续波输出。然而,高掺杂浓度将使增益介质内部产生严重的热效应,从而限制了输出功率的进一步提升。第二种方式是共掺杂 Pr^{3+} 等退敏化离子,通过共振转移使 Er^{3+} 离子下能级粒子数减少^[6],但由于共掺杂离子需要共享一部分泵浦能量,斜效率与输出功率都不高^[7]。第三种方式是通过级联 Er^{3+} 离子 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 近红外波段激光的振荡,使中红外激光下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 粒子数减少,从而实现中红外激光上、下能级间粒子数的反转,这种方式可以在相对较低掺杂浓度的条件下克服自终止效应,同时减小热效应,是实现 3 μm 中红外激光高斜效率、高功率输出的有效方式。2015 年,美国陆军实验室 Sanamyan^[8]使用掺杂浓度为 0.5% 的 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷在低温环境下实现了 1.6 μm 和 2.7 μm 双波长级联激光输出,其中 2.7 μm 中红外激光输出的斜效率为 24%,连续输出功率为 13 W;2016 年,他又采用掺杂浓度为 0.5% 的低掺杂 $\text{Er}:\text{YAG}$ 激光晶体,在 77 K 的低温下获得了 10 W 的 2.7 μm 中红外和 45 W 的 1.6 μm 近红外级联激光输出,中红外 2.7 μm 激光输出的斜效率为 15%^[9]。但低温实验系统复杂,难以实现实际应用。由于 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体对 976 nm 泵浦光的吸收截面很小^[10],通常 $\text{Er}:\text{YAG}$ 激光器的起振阈值很高。例

如, Sanamyan^[9]在低温下进行的掺杂浓度为 0.5% 的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 级联实验中,近红外与中红外激光起振的吸收泵浦功率(P_p)密度阈值分别高达 7.1 kW/cm^2 和 17.8 kW/cm^2 。常温下, $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体的泵浦吸收截面仅有低温下的 1/3,近红外与中红外激光的发射截面分别仅为低温条件下的 1/2 和 1/5^[9],因此常温环境下要在如此低浓度的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体中实现级联振荡是十分困难的。选择适合的掺杂浓度是在常温下实现级联输出的关键。

本文首先从 Er^{3+} 离子动力学方程的研究结果出发^[11-12],定性分析了级联近红外波段激光发射对 Er^{3+} 中红外激光斜效率的影响,讨论了激光阈值与掺杂浓度的关系。在此基础上选择了不同掺杂浓度的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体进行实验研究。在 7.5% 和 10% 两种掺杂浓度的晶体中观测到了级联振荡的现象。根据对比实验,相较于非级联的情况,两种 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体在级联条件下的中红外激光最大单脉冲能量分别提高了约 59.7% 和 45.2%。实验结果证明,级联近红外波段激光发射有助于中红外激光单脉冲能量的提升。

2 理论分析

Er^{3+} 离子具有复杂的能级结构, $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 能级之间的跃迁可实现近红外眼安全波段的激光发射^[13-14],能级 $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 之间的跃迁可用于产生中红外 3 μm 波段激光,还存在激发态吸收(ESA)、能量传递上转换(ETU)、交叉弛豫(CR)等多种能量转换过程,如图 1 所示。

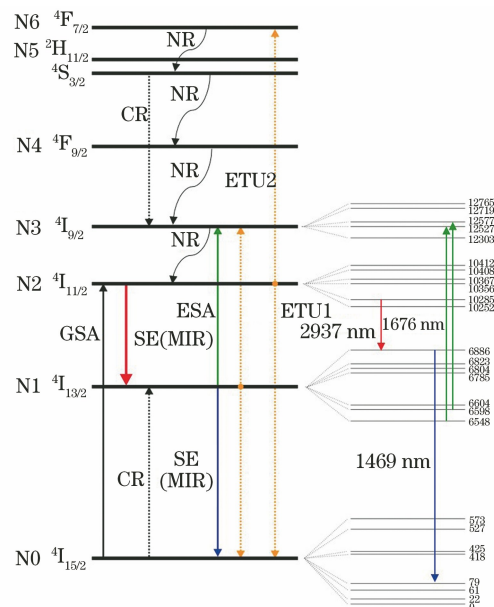


图 1 $\text{Er}:\text{YAG}$ 部分能级结构示意图

Fig. 1 Partial energy level diagram of $\text{Er}:\text{YAG}$

1994 年, Pollnau 等^[11]综合考虑各种能量转换过程,建立了相对完整的 Er³⁺ 离子速率方程模型。Lupei 等^[12]通过简化处理,对中红外激光反转粒子数密度和量子效率上限等进行了解析表达,根据其结果可从理论上定性分析级联对中红外激光斜效率的影响。在 976 nm LD 直接泵浦 Er³⁺ 离子中红外上能级⁴I_{11/2} 的情况下,量子效率的理论上限可表示为

$$\eta = 2 - \frac{\beta^2 W_2}{\alpha^2 W_1}, \quad (1)$$

式中: α 和 β 分别为中红外激光上、下 Stark 子能级的玻尔兹曼因子; W_1 与 W_2 分别为能量传递上转换 ETU1 和 ETU2 过程的速率。式(1)为仅考虑 ETU 作用时的量子效率上限,在考虑存在级联影响的情况下,⁴I_{13/2} → ⁴I_{15/2} 跃迁辐射近红外光子,处于⁴I_{13/2} 能级的部分粒子可通过 ESA 跃迁至⁴I_{9/2} 能级^[15],再通过快速无辐射跃迁返回至⁴I_{11/2} 中红外上能级,如图 1 所示。这一所谓循环级联过程使粒子数实现循环利用,这等效于使式(1)中的上转换速率 W_1 增加,而 W_2 保持不变,即量子效率增加,斜效率与量子效率成正比^[16],因此中红外激光斜效率将提升。

为实现常温 Er:YAG 晶体的级联输出,需要对掺杂浓度进行选择。根据速率方程,可得到中红外激光上能级与下能级之间的反转粒子数密度 Δn_{21} ^[12] 为

$$\Delta n_{21} = \alpha N_2 - \beta N_1 \approx \alpha \sqrt{\frac{R_{02} N_0}{W_2}} \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \right), \quad (2)$$

式中: R_{02} 为泵浦速率; N_0 为基态能级粒子数密度。根据式(2),在一定的泵浦速率下,中红外激光上下能级间的反转粒子数密度随着 W_1 的增加而增加, W_1 随掺杂浓度的升高而增大^[17],即掺杂浓度越高,激光起振的阈值越低,应选择尽可能高掺杂浓度的增益介质,但高掺杂浓度将带来严重的热效应,不利于功率提升。综合考虑以上两方面的因素,选择了介于通常的低掺杂(0.5%)与高掺杂(30%~50%)之间的 5%、7.5%、10% 三种掺杂浓度的 Er:YAG 晶体,研究其在常温下的中红外级联输出特性。

3 实验装置

图 2 为实验装置示意图。为研究常温下 Er:YAG 晶体的中红外级联输出特性,需要使近红外级联光也在腔内振荡,为此对腔镜镀膜进行了特殊设计,后腔镜(RM1)镀膜对 976 nm 泵浦光增透,对 1.4~1.8 μm 与 2.7~3.0 μm 泵浦光高反,输出耦合镜(OC1)镀膜对 1.4~1.8 μm 泵浦光高反,在 2.7~3.0 μm 波段的透过率 T 为 2.5%,谐振腔采用平-平腔。

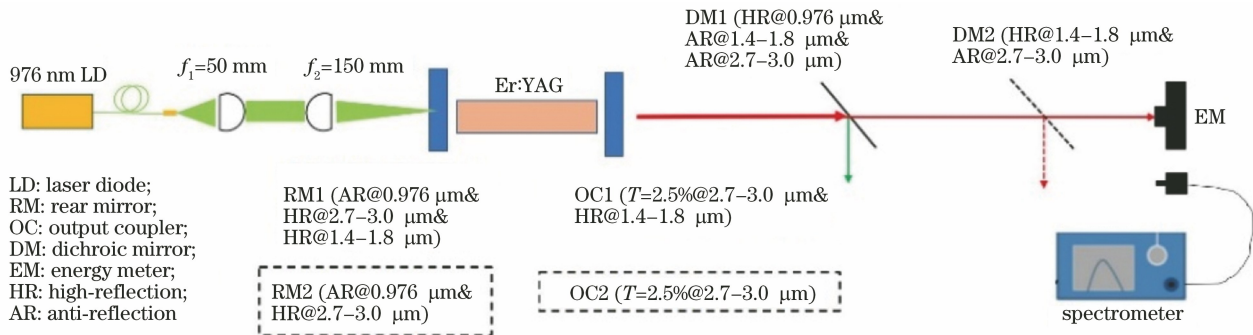


图 2 室温级联与非级联 Er:YAG 激光的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for room-temperature cascade and non-cascade Er:YAG laser

泵浦源采用凯普林公司所生产的 976 nm 稳波长光纤耦合输出 LD,芯径为 106.5 μm ,数值孔径为 0.22。泵浦光束经过焦距为 $f_1 = 50$ mm、 $f_2 = 150$ mm 的准直聚焦系统后对 Er:YAG 晶体进行端面泵浦,实测聚焦后泵浦光的束腰直径约为 0.4 mm。DM1 为对 976 nm 泵浦光高反、对 1.4~1.8 μm 和 2.7~3.0 μm 泵浦光增透的二向色镜,用于反射剩余未吸收的泵浦光。DM2 为对 1.4~1.8 μm 泵浦光高反、对 2.7~3.0 μm 泵浦光增透

的二向色镜,用以分离中红外与近红外激光。为减少晶体内部热沉积,实验中采用脉冲泵浦的方式,重复频率为 1 Hz,脉宽设为 6.5 ms,对应⁴I_{13/2} 近红外激光上能级寿命^[18]。

实验中采用沿<111>方向切割的 Er:YAG 晶体,横截面尺寸为 3 mm×3 mm。对晶体两个端面进行抛光,未进行镀膜。5%、7.5%、10% 三种掺杂浓度的 Er:YAG 晶体对泵浦光的吸收系数分别为 0.56, 0.72, 0.83 cm^{-1} ,晶体长度均为 10 mm。实验

过程中,首先在不放置 DM2 的情况下测量激光输出光谱,在实验装置中插入 DM2 以滤除近红外波段激光,随后,在实验装置中测量中红外激光输出能量。

4 实验结果与讨论

实验中,由于较高的起振阈值,在增加泵浦功率的过程中,掺杂浓度为 5% 的 Er:YAG 晶体达到阈值前后腔镜镀膜便出现了损伤,未出光。7.5% 和 10% 两种掺杂浓度的 Er:YAG 晶体中均获得了激光输出,所测得的光谱如图 3 所示。中红外波段激光的中心波长为 2937 nm,该波长源于 $^4I_{11/2}$ 中第

2Stark 子能级和 $^4I_{13/2}$ 中第 7Stark 子能级之间的跃迁^[19]。同时还观测到了近红外 1469 nm 的发射谱线。在 Er:YAG 晶体中,近红外波段的发射源于 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 能级之间的跃迁,其中 $^4I_{13/2}$ 分裂为 7 个 Stark 子能级, $^4I_{15/2}$ 分裂为 8 个 Stark 子能级,根据 Koetke 等^[15] 的光谱观测结果,Er:YAG 的 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 的近红外波段发射包含多条发射谱线,波长范围为 1450~1675 nm,这些发射谱线由不同 Stark 子能级之间的跃迁产生。根据计算,实验中所观测到的 1469 nm 发射波长对应 $^4I_{13/2}$ 中第 7Stark 子能级至 $^4I_{15/2}$ 中第 4Stark 子能级的跃迁。

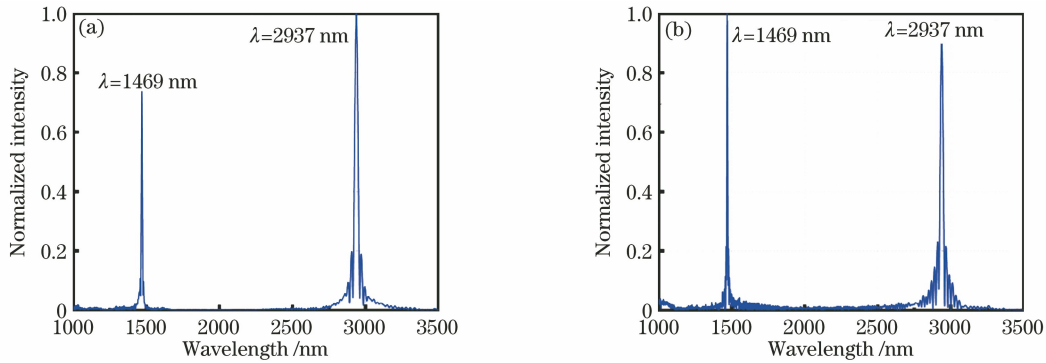


图 3 室温 Er:YAG 级联激光器的发射谱。(a) 掺杂浓度为 7.5% 的 Er:YAG; (b) 掺杂浓度为 10% 的 Er:YAG
Fig. 3 Emission spectra of cascade Er:YAG lasers at room temperature. (a) Er:YAG with doping concentration of 7.5%; (b) Er:YAG with doping concentration of 10%

在观测到 Er:YAG 晶体中级联发射存在的基础上,为了进一步研究级联对中红外激光输出特性的影响,设计了非级联谐振腔进行对比实验,并对中红外 2937 nm 激光输出能量分别进行了测量。非级联腔镜镀膜参数如图 2 中虚线框所示,后腔镜(RM2)对 976 nm 泵浦光增透,对 2.7~3.0 μm 中红外波段高反。输出耦合镜(OC2)在 2.7~3.0 μm 波段的透过率为 2.5%。在非级联腔中,仅中红外

2937 nm 波段的激光产生振荡,未观测到近红外波段激光输出。

在级联与非级联两种情况下,2937 nm 中红外激光输出能量随吸收泵浦光能量的变化如图 4 所示。从图中可以看出,两种情况下激光起振阈值相近,但斜效率不同。对于掺杂浓度为 7.5% 的 Er:YAG,级联与非级联时的斜效率分别为 4.3% 和 2.9%,2937 nm 中红外激光的最大单脉冲能量分别

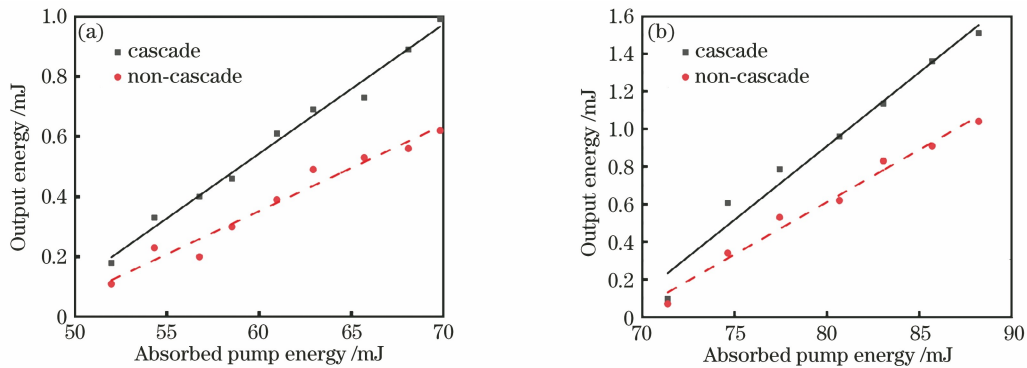


图 4 2937 nm 激光输出能量随吸收泵浦能量的变化。(a) 掺杂浓度为 7.5% 的 Er:YAG; (b) 掺杂浓度为 10% 的 Er:YAG
Fig. 4 Measured output energy of 2937 nm laser varying with absorbed pump energy. (a) Er:YAG with doping concentration of 7.5%; (b) Er:YAG with doping concentration of 10%

为 0.99 mJ 和 0.62 mJ; 掺杂浓度为 10% 的 Er:YAG 晶体在级联与非级联时的斜效率分别为 7.8% 和 5.6%, 级联与非级联时 2937 nm 中红外激光的最大单脉冲能量分别为 1.51 mJ 和 1.04 mJ。与非级联相比, 两种晶体在近红外 1469 nm 级联发射存在的情况下, 2937 nm 中红外激光的最大单脉冲能量分别提高了约 59.7% 和 45.2%。实验结果证明了级联可以提高中红外激光的最大单脉冲能量。

中红外激光斜效率的提升证明了以激发态吸收为基础的循环级联的存在, 为了确定激发态吸收波长, 进行了泵浦探测实验。实验装置如图 5 所示。

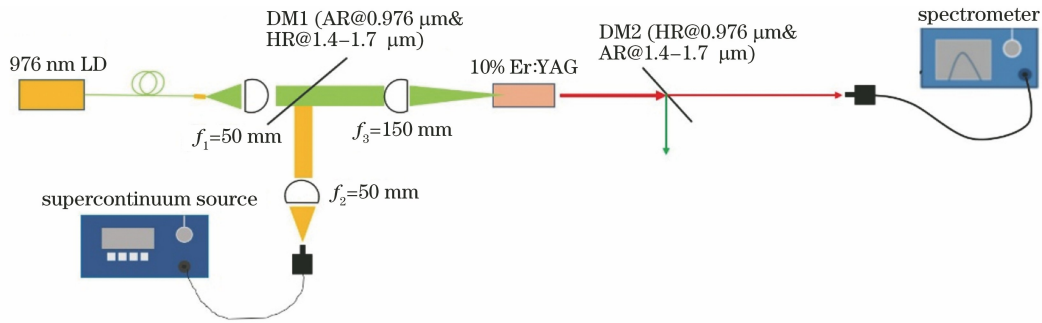


图 5 ESA 谱测量实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup used for measurement of ESA spectrum

超连续谱测量结果如图 6 所示, 虚线和点线分别为泵浦光关闭与泵浦功率为 6.7 W 两种状态下所测得的超连续谱输出, 通过将两组光谱数据相减得到 ESA 谱, 如图 6 中实线所示。从图 6 可以看出, 1676 nm 波长处存在一个激发态吸收峰。这一波长对应 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 中的第 1 Stark 子能级至第 2 Stark 子能级或第 2 Stark 子能级至第 3 Stark 子能级的跃迁(图 1)。激发态吸收波长与近红外级联发射的波长是不同的, 这一现象与 2017 年 Aydın 等^[20] 在 Er:ZBLAN 光纤中的实验结果是相似的, 在他们的实验中, 近红外级联发射的波长为 1614 nm, 激发态吸收波长为 1675 nm。这意味着从近红外级联发射的光子到参与激发态吸收中间存在一个非共振的能量转移过程。对于 Er:YAG 晶体, 1469 nm 波长近红外级联发射光子对应的波数为 6807 cm^{-1} , 1676 nm 波长激发态吸收光子对应的波数为 5967 cm^{-1} , 二者之间的波数差为 840 cm^{-1} , YAG 基质的最大声子能量为 857 cm^{-1} ^[21], 级联发射的光子与声子发生非弹性碰撞, 将能量转移给基质的声子, 转化为参与激发态吸收的光子。

基于激发态吸收的循环级联的物理过程可用一个简单模型来理解: 两个处于基态的 Er^{3+} 离子吸收

一个近红外波段超连续光源(Ocean Optics, HPX-2000)与一个 $0.976 \mu\text{m}$ 光纤耦合输出 LD 分别经过焦距为 50 mm 的透镜准直, 激光通过一个对 $0.976 \mu\text{m}$ 激光增透、对 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 激光高反的 45° 二向色镜(DM1), 再经焦距为 150 mm 的透镜聚焦后, 入射至掺杂浓度为 10% 的 Er:YAG 晶体中, DM2 为对 $0.976 \mu\text{m}$ 激光高反和对 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 激光增透的 45° 二向色镜, 用来反射剩余泵浦光, 使用光谱仪(Thorlabs, OSA-205C)分别测量泵浦光关闭和开启状态下的输出光谱。

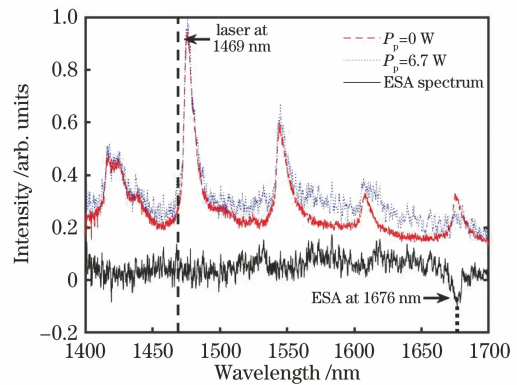


图 6 泵浦光开启与关闭状态下的超连续谱(通过对两组光谱信号可得激发态吸收谱)

Fig. 6 Supercontinuum spectra with and without pumping (ESA can be observed from difference of these two sets of spectral signals)

976 nm 泵浦光后跃迁至 ${}^4I_{11/2}$ 中红外上能级, 随后通过受激发射填充 ${}^4I_{13/2}$ 能级, 辐射两个 2937 nm 光子。这两个处于 ${}^4I_{13/2}$ 能级中的 Er^{3+} 离子中的一个离子返回基态并辐射 1469 nm 光子, 该光子与基质声子发生非弹性碰撞, 将能量传递给声子, 自身转化为特征波长为 1676 nm 的激发态吸收光子, 另一个 ${}^4I_{13/2}$ 能级中的 Er^{3+} 离子吸收这一光子并跃迁至 ${}^4I_{9/2}$ 能级, 通过快速无辐射跃迁返回至 ${}^4I_{11/2}$ 中红

外上能级,再通过受激辐射向下跃迁而产生第 3 个 2937 nm 光子,这相当于 1.5 的量子效率。这一循环级联过程使粒子数实现循环利用,从而提高了中红外激光斜效率。

5 结 论

报道了常温下 Er:YAG 晶体中红外级联激光器。从实验上证实了常温 Er:YAG 晶体存在级联发射,观测到了级联发射的特征波长为 1469 nm。通过泵浦探测实验确定了激发态吸收的特征波长为 1676 nm。采用 7.5% 和 10% 两种掺杂浓度的 Er:YAG 晶体,对比级联与非级联实验结果,发现在级联辅助下中红外激光的最大单脉冲能量分别提高了约 59.7% 和 45.2%。循环级联使粒子数实现循环利用,是中红外激光斜效率得以提升的主要原因。实验结果表明级联近红外发射具有提升中红外激光输出性能的潜力。在级联的基础上,通过进一步优化掺杂浓度,Er³⁺ 掺杂 3 μm 中红外激光有望在室温环境下获得更高的连续输出功率。

参 考 文 献

- [1] Sanamyan T, Evans J W, McDaniel S A. Path to doubling the efficiency of mid-IR erbium lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16452-16457.
- [2] You Z Y, Sun Y J, Sun D L, et al. High performance of a passively Q-switched mid-infrared laser with Bi₂Te₃/graphene composite SA[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 871-874.
- [3] Švejkar R, Šulc J, Jelínková H. Er-doped crystalline active media for ~ 3 μm diode-pumped lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 74: 100276.
- [4] Chen D W, Fincher C L, Rose T S, et al. Diode-pumped 1-W continuous-wave Er:YAG 3-μm laser [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(6): 385-387.
- [5] Shen B J, Kang H X, Chen P, et al. Performance of continuous-wave laser-diode side-pumped Er:YSGG slab lasers at 2.79 μm[J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(4): 511-515.
- [6] Zhang P X, Chen Z Q, Hang Y, et al. Enhanced 2.7 μm mid-infrared emissions of Er³⁺ via Pr³⁺ deactivation and Yb³⁺ sensitization in LiNbO₃ crystal [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25202-25210.
- [7] Chen J K, Sun D L, Luo J Q, et al. Spectroscopic properties and diode end-pumped 2.79 μm laser performance of Er, Pr: GYSGG crystal[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23425-23432.
- [8] Sanamyan T. Diode pumped cascade Er:Y₂O₃ laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(12): 125804.
- [9] Sanamyan T. Efficient cryogenic mid-IR and eye-safe Er:YAG laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(11): D1-D6.
- [10] Stange H, Petermann K, Huber G, et al. Continuous wave 1.6 μm laser action in Er doped garnets at room temperature[J]. *Applied Physics B*, 1989, 49(3): 269-273.
- [11] Pollnau M, Graf T, Balmer J E, et al. Explanation of the cw operation of the Er³⁺ 3-μm crystal laser[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(5): 3990-3996.
- [12] Lupei V, Georgescu S. Erbium 3-μm laser as an upconversion system[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(5): 1265-1272.
- [13] Song R, Liu X T, Fu S Y, et al. Simultaneous tailoring of longitudinal and transverse mode inside an Er:YAG laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111404.
- [14] Li S H, Wang Q, Song R, et al. Laser diode pumped high-energy single-frequency Er:YAG laser with hundreds of nanoseconds pulse duration[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031401.
- [15] Koetke J, Huber G. Infrared excited-state absorption and stimulated-emission cross sections of Er³⁺-doped crystals[J]. *Applied Physics B*, 1995, 61(2): 151-158.
- [16] Pollnau M, Spring R, Ghisler C, et al. Efficiency of erbium 3-μm crystal and fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(4): 657-663.
- [17] Iskandarov M O, Nikitichev A A, Stepanov A I. Quasi-two-level Er³⁺:Y₃Al₅O₁₂ laser for the 1.6-micrometer range[J]. *Journal of Optical Technology*, 2001, 68(12): 885-888.
- [18] Kaminskii A A, Petrosyan A G, Denisenko G A, et al. Spectroscopic properties and 3 μm stimulated emission of Er³⁺ ions in the (Y_{1-x}Er_x)₃Al₅O₁₂ and (Lu_{1-x}Er_x)₃Al₅O₁₂ garnet crystal systems [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 1982, 71(2): 291-312.
- [19] Sang Y B, Liu D, Xia X S, et al. A multi-wavelength pulsed mid-infrared laser based on Er:YAG [J]. *Optics Communications*, 2021, 485: 126667.
- [20] Aydın Y O, Fortin V, Maes F, et al. Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 235-238.
- [21] Wang L, Huang H T, Shen D Y, et al. Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped Er:Lu₂O₃ and Er:Y₂O₃ ceramic at 2.7 μm[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19495-19503.